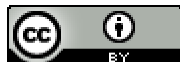
Zakharov, A. V. (2023). Influence of the composition of the flux, type and polarity of the current on the efficiency of electrochemical processes in the electroslag system. *Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal, 24*, 82-89. Ostrava: Tuculart Edition & European Institute for Innovation Development. (In Ukrainian)
Захаров, А. В. (2023). Вплив складу флюсу, роду і полярності струму на ефективність електрохімічних процесів в електрошлаковій системі. *Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal*, *24*, 82-89. Ostrava: Tuculart Edition & European Institute for Innovation Development.

DOI: 10.47451/inn2023-02-01

The paper will be published in Crossref, ICI Copernicus, BASE, Zenodo, OpenAIRE, LORY, Academic Resource Index ResearchBib, J-Gate, ISI International Scientific Indexing, ADL, JournalsPedia, Mendeley, eLibrary, and WebArchive databases.



Andrii V. Zakharov, Postgraduate student, Department of Service Engineering and Materials Technology in Mechanical Engineering, O.I. Sidashenko State University of Biotechnology. Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0001-9894-7355

Influence of the composition of the flux, type and polarity of the current on the efficiency of electrochemical processes in the electroslag system

Abstract: The article examines the peculiarities of the chemical composition of the fluxes used for electroslag surfacing, as well as the type and polarity of the current, which have a significant impact on the efficiency of electrolytic processes in the electroslag system. The purpose of the article is to research methods of obtaining high-quality metal with specified physical and mechanical properties and service characteristics. In the course of the conducted research, it was established that the considered variants of ESN are static by their electrochemical conditions and do not allow to actively influence the electrolysis processes, to regulate the intensity of recovery of elements from slag to metal. In addition, with DC electrolytic processes, as calculations show, a little more than 30% of the total melting current is consumed. Of these positions, the most flexible and economical is the electroslag process using alternating current with an additional application of a certain (if necessary, adjustable) amount of direct current to the slag bath. It was found that a further increase in the current density of the constant component increases [V] to 0.72% with further stabilization, which indicates the exhaustion of the possibilities of electrolytic reduction of vanadium under these conditions (ESH on a constant current of reverse polarity on this slag-electrolyte provides close values (0.8%) of the concentration of vanadium in the ingot). Thus, the obtained information indicates that the selection of the composition of the slag-electrolyte and the mode of electrolysis should be carried out taking into account the electrochemical parameters in the electroslag system. It has been proven that a rational choice of the composition of the electrolyte slag and the electrolysis mode, based on the knowledge of the electrochemical laws of the process, can ensure the effectiveness of this option in specific different methods of ESH. Experiments of electroslag surfacing according to this scheme showed that the residual content of the recoverable element depends on the anodic current density at the stage of the bath, and at a fixed value of ik - on the composition of the flux. That is, two main parameters that determine the speed of electrochemical reactions are combined and act here. The main directions of conducting studies of the electroslag surfacing process to obtain high-quality surfacing metal with the necessary indicators of wear resistance have been determined. Further research should be aimed at determining the effectiveness of the use of modifying impurities of different chemical composition, which are introduced into the slag bath during the process of electroslag surfacing in order to obtain a surfacing metal with higher quality indicators.

Keywords: flux, electrochemical processes, surfacing parameters, electroslag surfacing technology, slag.



Андрій Вадимович Захаров, аспірант кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні, Державний біотехнологічний університет імені О.І. Сідашенка. Харків, Україна. ORCID: 0000-0001-9894-7355

Вплив складу флюсу, роду і полярності струму на ефективність електрохімічних процесів в електрошлаковій системі

Анотація: У статті досліджуються особливості хімічного складу застосовуваних флюсів для електрошлакової наплавки, а також рід та полярність струму які мають значний вплив на ефективність електролітичних процесів в електрошлаковій системі. Метою статті є дослідження методів отримання якісного металу, з заданими фізико-механічними властивостями та службовими характеристиками. У ході проведеного дослідження встановлено, що розглянуті варіанти ЕШН за своїми електрохімічними умовами статичні і не дозволяють активно впливати на електролізні процеси, регулювати інтенсивність відновлення елементів із шлаку в метал. До того ж при ЕШН на постійному струмі електролітичні процеси, як показують розрахунки, витрачається трохи більше 30% від загального струму плавки. З цих позицій найбільш гнучким і економічним є електрошлаковий процес на змінному струмі з додатковим накладенням на ванну шлаку певної (при необхідності регульованої) величини постійного струму. Виявлено, що подальше збільшення щільності струму постійної складової підвищує [V] до 0,72% при подальшій стабілізації, що свідчить про вичерпання можливостей електролітичного відновлення ванадію в цих умовах (ЕШН на постійному струмі зворотної полярності на цьому шлаку-електроліті забезпечує близькі значення (0,8%) концентрації ванадію в злитку). Таким чином, отримані відомості свідчать, що вибір складу шлаку-електроліту і режиму електролізу повинен здійснюватися з урахуванням електрохімічних параметрів в електрошлаковій системі. Доведено, що раціональний вибір складу шлаку електроліту та режиму електролізу, заснований на знанні електрохімічних закономірностей процесу, може забезпечити цьому варіанту ефективність у конкретних різних способах ЕШН. Експерименти електрошлакової наплавки за цією схемою показали, що залишковий вміст елемента, що відновлюється, залежить від анодної щільності струму на стадії ванни, а при фіксованому значенні ik - від складу флюсу. Тобто тут поєднуються та діють два головні параметри, що визначають швидкість електрохімічних реакцій. Визначені основні напрями проведення досліджень процесу електрошлакової наплавки для отримання якісного наплавленого металу з необхідними показниками зносостійкості. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на визначення ефективності застосування модифікуючих домішок різного хімічного складу які вводять у шлакову ванну під час процесу електрошлакової наплавки для отримання наплавленого металу з більш високими якісними показниками.

Ключові слова: флюс, електрохімічні процеси, параметри наплавки, технологія електрошлакової наплавки, шлак.



Вступ

Роль складу шлаку у формуванні хімічного складу металу при електрошлаковому процесі підкреслюють багато дослідників (*Латаш та ін., 1970*; *Патона, 1980*; *Сущук-Слюсаренко та ін., 1989*; *Клюєв та Каблуковський, 1969*). При цьому основна увага приділяється його здібностям, що рафінують. У ряді робіт розглядаються електрохімічні властивості флюсових розплавів, аналізуються електрохімічні процеси та їх зв’язок з умовами перебігу окисно-відновних реакцій.

Проте всі ці дослідження є епізодичні роботи і не дозволяють повною мірою оцінити внесок електрохімічних процесів у формування хімічного складу електрошлакового металу. Тут слід зазначити дослідження уральської школи, в яких часом переконливо показано вплив електрохімічних закономірностей та їх ефективність у різних технологічних переплавних процесах, можливості модифікування та легування металу певними елементами, що забезпечують підвищення фізико-механічних та експлуатаційних якостей металу, що виплавляється.

Предметом дослідження є особливості хімічного складу застосовуваних флюсів для електрошлакової наплавки, а також рід та полярність струму які мають значний вплив на ефективність електролітичних процесів в електрошлаковій системі.

Об'єктом дослідження є методи отримання якісного металу, з заданими фізико-механічними властивостями та службовими характеристиками.

Метою статті є дослідження методів отримання якісного металу, з заданими фізико-механічними властивостями та службовими характеристиками.

Виходячи з мети дослідження були визначені наступні завдання:

- визначення особливостей протікання процесу електрошлакового наплавлення з використанням флюсу різного складу;
- визначення впливу роду і полярності струму на ефективність електрохімічних процесів;
- аналіз визначення раціонального вибору режимів наплавлення;
- отримання якісного наплавленого металу, з високими показниками зносостійкості.

В ході дослідження були використані матеріали вчених і дослідників в даній області, в тому числі, праці Ю.М. Кускова, Ю.В. Латаша, Б.І. Медовара та І.М. Рибалко.

Опис дослідження

Достатньо чітко проявляються залежності складу металу від складу шлаку ще раз наголошують на необхідності систематичного вивчення обмінних реакцій при електрошлаковому процесі з метою подальшого вдосконалення варіантів електрошлакових технологій. Концентраційна залежність елементів у системі шлак-метал при електрошлаковому процесі нами розглянуто на прикладі поведінки ванадію, титану та магнію на тлі фторидних флюсів системи CaF_2 - Me_aO_b та CaF_2 – Al_2O_3 – Me_aO_b (типові флюси АНФ – ІП та АНФ – 6).

Процес вели постійному струмі зворотної полярності, де явища електролізу виявляються досить наочно. На рисунку 1 наведено залежності концентрації відновлюваного елемента [Me] в електрошлаковому металі від вмісту його оксиду в шлаку (*Рисунок 1*). Концентрація ванадію у злитку закономірно зростає із збільшенням добавки оксиду ванадію до флюсу АНФ – ІП. Діапазон добавки V_2O_5 до флюсу від 5 до 20 мас.% дає приріст концентрації ванадію в металі від 0,5 до 1,0%. Причому Δ[V] зменшується зі збільшенням кількості оксиду, що додається (Δ [V]5 – 10 = 0,28%, Δ [V]10-15 = 0,16%, Δ [V]15-20 = 0,06%). Виходячи з цього можна прийняти, що найбільш раціональна добавка V_2O_5 до шлаку близько 10 мас.%. Очевидно, це пов'язано з тим, що V_2O_5, маючи

електронно-діркову провідність (*Рибалко та Захаров, 2022*), знижує ступінь іонності шлаку-електроліту та його ефективність.

Аналогічний характер залежності [Me] від вмісту (MeO) у шлаку спостерігається при відновленні магнію з флюсу системи $CaF_2 – MgF_2 – MgO$ (*Рисунок 1*). Кількісні значення [Me] відрізняються від попередніх на порядок (менший бік). Ця відмінність обумовлена електрохімічними властивостями елементів, що відновлюються. Слід також врахувати високу хімічну активність магнію та його обмежену розчинність у залізовуглецевому металі. Інший характер концентраційної залежності по титану.

Постійність [Ti] у металі, причому порівняно низькому рівні, зі збільшенням вмісту в шлаку його оксиду обумовлено кількома причинами. По-перше, титан має великий засіб до кисню, що забезпечує інтенсивне його анодне розчинення. Ця обставина посилюється наявністю високого окисного потенціалу в електрошлаковій системі.

Катодний процес у зв'язку з цим зводиться лише до перезарядки іонів титану на межі метал-шлак



$$Ti^{4+} + 2e \rightleftarrows Ti^{2+}. \qquad (1)$$

По-друге, система $CaF_2 – TiO_2$ має велику область розшарування [7], а рівновага реакції (2) зміщується вправо зі збільшенням температури та концентрації TiO_2 у розплаві



$$2CaF^2 + TiO^2 = 2CaO + TiF^{4\uparrow}. \qquad (2)$$

Залежність ефективності переходу елементів із шлаку до металу від їх електрохімічних властивостей ілюструють дані таблиці 1, з якої випливає, що електронегативні елементи відновлюються в менших кількостях. Таблиця 1 являє собою електрохімічний ряд елементів у фоновому розплаві CaF^2 (*Таблиця 1*).

Розмір додаткового постійного струму, % (*Рисунок 1*).

Елемент B, Ti, V, Mo, Ni, Nb, Cr. Концентрація в злитку, мас.% 0,04, 0,039, 0,34, 0,40, 0,44, 0,65, 0,69. Відзначається і вплив фонового складу флюсу на ефективність переходу елементів із шлаку до металу. Наприклад, спостерігається помітна різниця у кількості відновленого ванадію в електрошлаковому металі (*Рисунок 2*) при використанні різних флюсових фонових систем. Найбільш ефективним є фоновий склад $CaF_2 – Al_2O_3$, в якому спостерігалися і найвищі кінетичні показники електродного процесу при відновленні ванадію.

Особливе місце в ефективності електролітичних реакцій ЕШН займає рід і полярність струму, що визначають напрямок електродних реакцій на окремих стадіях електрошлакового процесу. Напрямок і характер обмінних процесів у разі ускладнюється складом шлаку.

Загальні закономірності впливу роду струму та полярності на відновлення елементів із шлаку в метал при ЕШН. Як і слід очікувати, найбільша залишкова кількість відновленого елемента в електрошлаковому металі спостерігається при веденні процесу на постійному струмі зворотної полярності, коли катодом є металева ванна.

Дещо менше значення [Me] при розплаві на постійному струмі прямої полярності, коли відновлення елементів відбувається в рідку плівку на конусі електрода, що витрачається. Тобто анодне розчинення елементів, що відновлюються, на стадії ванни знижує загальну ефективність постійного струму прямої полярності. Зазначена закономірність спостерігається при відновленні різних елементів як для хімічно активних,

з високими значеннями потенціалу розкладання Ер (Mg, B, Li), так і для елементів з низькими значеннями Ер (V, Nb, Mo, W), та обумовлена електролізними явищами в електрошлаковій системі. Зміна температури реакційної межі при зміні полярності не може вплинути на відновний процес, оскільки ця зміна не значна, а загальна температура процесу в умовах експерименту становила близько 1870°К, що істотно нижче необхідної (2100°К) для відновлення магнію вуглецем з оксидів або фторидів (*Кусков та ін., 2001*). Виняток становить титан, концентрація якого в металі не залежить від роду та полярності струму. Такі закономірності відзначаються та інші дослідниками (*Кусков та ін., 2020*; *Жеребцов та Чернишов, 2016*; *Миронов та ін., 1977*).

При застосуванні змінного струму електролізні процеси проявляються слабко та відновлювальні процеси, в основному, обумовлюються хімічними реакціями в системі метал-шлак. У розглянутих закономірностях відзначимо тенденцію до стабілізації Δ[Me] при вмісті (Me_aO_b) у шлаку понад 20%. Цей факт дозволяє намітити раціональні склади флюсу для електрохімічного легування металу в електрошлакових процесах.

Аналізуючи результати електрохімічного відновлення елементів з шлаку метал при електрошлаковому процесі, слід зазначити, що концентрація [Me] істотно залежить від технологічної схеми процесу (*Рисунок 1*). Наприклад, найбільш високі значення [Me] отримані при ЕШН за біфілярною схемою (шлак АНФ - ІП + 5, 10, 15 мас.% V_2O_5), коли відновлення елементів відбувається в рідку плівку металу на конусі електродів, що витрачаються. У цій схемі реалізується осадження елемента за найсприятливіших електрохімічних умов (високі густини катодного струму), зумовлених сутністю технологічної схеми процесу.

Анодне розчинення елемента на стадіях конуса (в анодні напівперіоди) і металевої ванни не отримує істотного розвитку через досить велику концентрацію в шлаку оксиду відновленого елемента.

Компенсуючими анодними процесами при цьому можуть бути:



$$F^{-} - e \rightarrow F,$$

$$[Si^{4+}] + 4e + O_2 \rightarrow (SiO_2). \qquad (3)$$

Залишковий вміст відновленого ванадію в електрошлаковому металі в цьому випадку перевищує навіть [V], що досягається при переплаві на постійному струмі, де електролізні процеси повинні отримати найповніший розвиток. Однак через те, що в біфілярній схемі відновлювальний процес здійснюється на площі, що перевищує в 2 рази таку при ЕШН на постійному струмі прямої полярності та загальмованості анодних процесів за участю ванадію, зрештою в електрошлаковому металі формуються високі залишкові вмісту ванадію (*Кусков та ін., 2015*).

Результати роботи

Розглянуті варіанти ЕШН за своїми електрохімічними умовами статичні і не дозволяють активно впливати на електролізні процеси, регулювати інтенсивність відновлення елементів із шлаку в метал. До того ж при ЕШН на постійному струмі електролітичні процеси, як показують розрахунки, витрачається трохи більше 30% від загального струму плавки. З цих позицій найбільш гнучким і економічним є

електрошлаковий процес на змінному струмі з додатковим накладенням на ванну шлаку певної (при необхідності регульованої) величини постійного струму.

Обґрунтований, раціональний вибір складу шлаку електроліту та режиму електролізу, заснований на знанні електрохімічних закономірностей процесу, може забезпечити цьому варіанту ефективність у конкретних різних способах ЕШН. Експерименти електрошлакової плавки за цією схемою (*Рисунок 1*) показали, що залишковий вміст елемента, що відновлюється, залежить від анодної щільності струму на стадії ванни, а при фіксованому значенні i_k - від складу флюсу. Тобто тут поєднуються та діють два головні параметри, що визначають швидкість електрохімічних реакцій.

Ефективність накладання складової постійного струму на електрошлакову ванну з метою відновлення будь-якого елемента зі шлаку в метал тим більше, чим значніша різниця в концентраціях [Me], які можуть бути досягнуті при використанні тільки змінного або постійного струмів. І тут діапазон регулювання кількості відновленого елемента розширюється. Так, наприклад, при 5 мас.% V_2 O_5 на тлі CaF_2 очікувати значного приросту Δ[V] за рахунок накладання постійного струму не слід, оскільки різниця в концентраціях [V], отриманих на постійному струмі зворотної полярності та змінному струмі, становить всього близько 0,1%.

Накладення постійної складової струму для інтенсифікації електролізних процесів у цьому випадку буде доцільним при вмісті в шлаку V_2O_5 10 мас.% і більше. Для оцінки доцільності накладання постійного струму та ефективності цього процесу можна скористатися величиною відношення концентрацій відновленого елемента при ЕШН на постійному та змінному струмі

$$\frac{[Me]_{\text{пер}}}{[Me]_{\text{пост}}} = \text{Кэ} \quad (4)$$

Наприклад, для ванадію і магнію цей показник при (Me_aO_b) = 20 мас.% в шлаку становить відповідно 1,7 і 3,0, тобто при відновленні магнію накладання постійної складової має бути більш ефективним, хоча абсолютна концентрація [V] на порядок перевищує [Me].

Тому при оцінці доцільності додаткового накладання постійного струму слід враховувати і ефект впливу елемента, що осаджується, на фізико-механічні та експлуатаційні властивості металу, що переплавляється. При вивченні впливу величини щільності складової постійного струму відновлення ванадію отримано залежність (*Рисунок 3*), яка, здавалося б, суперечить відомим положенням (флюс АНФ – 6 + 10 мас.%).

Однак, зіставляючи її з отриманими раніше поляризаційними кривими для розплаву цього складу, можна встановити досить чітку кореляцію експериментальних даних. Лінійність залежності [V] = f(i_k) на початковій ділянці обумовлена перебігом процесу перезарядки іонів ванадію



$$V^{3+} + e \rightarrow V^{2+} \quad (5)$$

у цьому діапазоні і та η. Вищі значення i_η при електрошлаковому процесі, порівняно з i_η отриманими в електрохімічному осередку, обумовлено досить інтенсивним рухом взаємодіючих фаз.

Висновки

Подальше збільшення щільності струму постійної складової підвищує [V] до 0,72% при подальшій стабілізації, що свідчить про вичерпання можливостей електролітичного відновлення ванадію в цих умовах (ЕШН на постійному струмі зворотної полярності на цьому шлаку-електроліті забезпечує близькі значення (0,8%) концентрації ванадію в злитку). Таким чином, отримані відомості свідчать, що вибір складу шлаку-електроліту і режиму електролізу повинен здійснюватися з урахуванням електрохімічних параметрів в електрошлаковій системі.



Перелік літературних джерел:

Жеребцов, С. М., Чернишов, Є. А. (2016). Особливості фізико-хімічних властивостей флюсів, що використовуються у технологіях електрошлакового переплаву. *Праці НДТУ, № 1* (112), с. 228-235. [Zherebtsov, S. N., & Chernyshov, E. A. (2016). Features of physical and chemical properties of fluxes used in electroslag remelting technologies. *NGTU Works*, *1*(112), 228-235]

Клюєв, М. М., Каблуковський, О. Ф. (1969). *Металургія електрошлакового переплаву*. Київ: Металургія. [Klyuev, M. M., & Kablukovskyi, A. F. (1969). *Metallurgy of electroslag remelting*. Moscow: Metallurgy]

Кусков, Ю. М. та ін. (2001). *Електрошлакова наплавка*. Москва: Наука та технології. [Kuskov, Yu. M. et al. (2001). *Electroslag surfacing*. Moscow: Science and Technologies]

Кусков, Ю. М. та ін. (2015). *Електрошлакове наплавлення дискретними матеріалами, різні способи виготовлення*. ІЄЗ ім. Б.О. Патона, Зварювальне виробництво. [Kuskov, Yu. M. et al. (2001). *Electroslag surfacing*. Moscow: Science and Technologies]

Кусков, Ю. М. та ін. (2020). *Електрошлакові технології наплавлення та рециклінгу металевих та металовмісних відходів: монографія*. Київ: Інтерсервіс. [Kuskov, Yu. M. et al. (2020). *Electroslag technologies of surfacing and recycling of metal and metal-containing waste: Monograph*. Kyiv: Interservice]

Латаш, Ю. В., Медовар, Б. І. (1970). *Електрошлаковий переплав*. Москва: Металургія. [Latash, Yu. V., & Medovar, B. I. (1970). *Electroslag smelting*. Moscow: Metallurgy]

Миронов, Ю. М. та ін. (1977). Регулювання хімскладу металу при ЕШП за допомогою постійної складової струму. *Тези доповідей. III Всесоюзна конференція із сучасних проблем електрометалургії стали*, с. 78-79. [Mironov, Yu. M. et al. (1977). Regulation of the chemical composition of the metal in the case of electrical engineering with the help of a constant component of the current. *Theses of Reports. 3rd All-Union Conference on Modern Problems of Steel Electrometallurgy*, 78-79]

Пастухов, О. О., Мусіхін, В. І., Ватолін, Н. О. (1984). *Електричні властивості нестехіометричних оксидних розплавів*. Свердловськ: УНЦ АН СРСР. [Pastukhov, E. A., Musikhin, V. I., & Vatolin, N. A. (1984). *Electrical properties of non-stoichiometric oxide melts*. Sverdlovsk: UNC Academy of Sciences of the USSR]

Патон, Б. Є., Медовар, Б. І. (ред.) (1980). *Електрошлакове зварювання та наплавлення*. Москва: Машинобудування. [Paton, B. E., & Medovar, B. I. (Eds.). *Electroslag welding and surfacing*. Moscow: Mashinobuduvannya, 1980]

Рибалко, І. М., Захаров, А. В. (2022). Фізико-хімічні властивості флюсів для електрошлакового наплавлення. *Наукові вісті Далівського університету*, *№ 23*, с. 1-5.

[Rybalko, I. M., & Zakharov, A. V. (2022). Physical and chemical properties of fluxes for electroslag surfacing. *Scientific News of Daliv University*, *23*, 1-5]

Рибалко, І. М., Сайчук, О. В., Захаров, А. В. (2022). Фізико-хімічні властивості флюсів та їх технологічні параметри. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, *Vol. 1*, *No. 5*, pp. 70-76. URL: http://doi.org/10.46299/j.isjea.20220105.09 [Rybalko, I. M., Saichuk, O. V., & Zakharov, A. V. (2022). Physical and chemical properties of fluxes and their technological parameters. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, *1*(5), 70-76. http://doi.org/10.46299/j.isjea.20220105.09]

Сущук-Слюсаренко, І. І., Лічко, І. І., Козулін, М. Г. та ін. (1989). *Електрошлакове зварювання та наплавлення у ремонтних роботах*. Київ: Наукова думка. [Sushchuk-Slyusarenko, I. I., Lychko, I. I., Kozulin, M. G. et al. (1989). *Electroslag welding and surfacing in repair works*. Kyiv: Naukova Dumka]



Додаток

Таблиця 1. Відновлення елементів на тлі CaF_2 при ЕШН (вміст MeaOb у шлаку 2 моль, %)

Елемент	B	Ti	V	Mo	Ni	Nb	Cr
Концентрація в злитку, мас.%	0,04	0,039	0,34	0,40	0,44	0,65	0,69

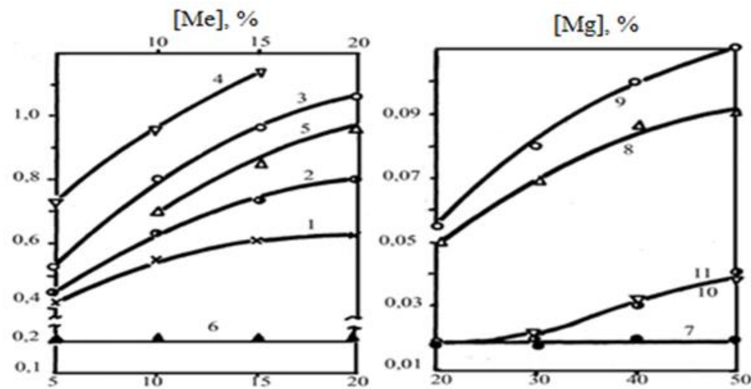


Рисунок 1. Концентрації відновлюваних елементів в електрошлаковому металі в залежності від складу флюсу, роду та полярності струму 1-5 – концентрація ванадію при веденні процесу на змінному, постійному струмі прямої та зворотної полярності, біфілярної схеми та при додатковому накладенні постійного струму; 6 – концентрація титану при веденні процесу на змінному та постійному струмі; 7-11 – концентрація магнію при веденні процесу на змінному, постійному струмі прямої та зворотної полярності, біфілярній схемі, моносхемі з додатковим накладенням 10% постійного струму.

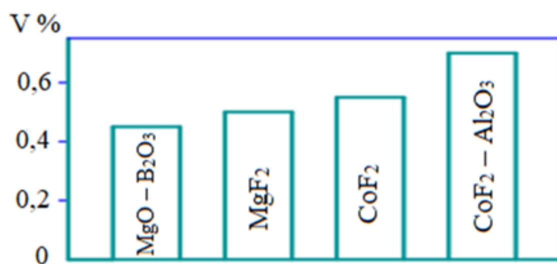


Рисунок 2. Вплив фонового складу флюсу на відновлення ванадію

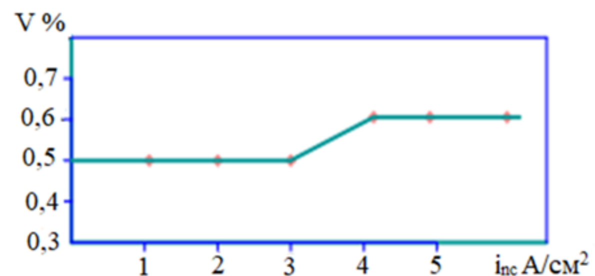


Рисунок 3. Залежність концентрації ванадію в електрошлаковому металі від величини щільності складової постійного струму